

Aus dem Physiologischen Institut der Universität München  
Vorstand: Prof. Dr. med. Richard Wagner

# **Über das Druck-Volum-Diagramm von in Längsrichtung vorgespannten Schweineaorten**



Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin  
verfaßt und einer Hohen Medizinischen Fakultät der  
Ludwig - Maximilians - Universität zu München  
vorgelegt von

**Hans Sigl**  
aus Straubing

1958

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. med. Ewald Kapal

Mitberichterstatter: Prof. Dr. med. Richard Wagner

Dekan: Prof. Dr. med. Kurt Kolle

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 1958

*Aus dem Physiologischen Institut der Universität München*  
(Vorstand: Prof. Dr. R. Wagner)

## **Über das Druck-Volum-Diagramm von in Längsrichtung vorgespannten Schweineaorten**

*von Hans Sigl*

Mit zwei Abbildungen

Die vorliegende Arbeit ist ein weiterer Beitrag zu früheren Versuchen und Veröffentlichungen über das elastische Verhalten des arteriellen Windkessels. *Wagner* und *Kapal* untersuchten die Elastizität der Brustorta (7) und *Bader* dehnte die Untersuchungen auf die gesamte thorakale und abdominale Aorta aus (1). Bei den bisher erfolgten Dehnungsversuchen lagen die Aorten frei beweglich in einem Wasserbad. Da jedoch die Aorten im lebenden Organismus in der Länge fixiert sind und beim Herauslösen aus dem Körper zusammenschrumpfen (5, 6), mußte es von Interesse sein, die Aorten in fixiertem und dem ursprünglichen Situs entsprechenden vorgespannten Ausgangszustand zu untersuchen.

### *Methodik*

Die zu den Versuchen verwendete Apparatur wurde von *Wagner* und *Kapal* entwickelt (8). Sie erhielt zusätzlich eine horizontal über das Wasserbecken verlaufende Stange, an welcher senkrecht dazu zwei Klemmen verschieblich angebracht waren. Diese Vorrichtung gestattete es, die zu untersuchenden Aorten in die gewünschte Länge vorzuspannen und zu fixieren.

Die Aorten stammten von frisch geschlachteten Schweinen. Es wurde jeweils die Brustorta, also das Stück zwischen den Klappen und dem Zwerchfell, untersucht. Die Länge der Aorten in situ wurde vor dem Auslösen mit einem Maßband bestimmt und wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als *physiologische Länge* bezeichnet.

Es wurden insgesamt zehn Aorten auf folgende Weise untersucht: auf drei Probendehnungen folgten nacheinander eine *freie* Dehnung, bei der die Aorta nur an einem Ende fixiert war, das andere Ende aber frei beweglich im Wasser lag. Hierauf wurde jede Aorta auf ihre physiologische Länge vorgespannt und fixiert und in diesem Zustand gedehnt. Es folgten nun vier weitere Dehnungen, wobei die Aorten jeweils auf eine Länge vorgespannt waren, die sie in freier Lage bei einem Innendruck von 50, 100, 150 und 200 mm Hg erreichten. Der aus der Vorspannung resultierende Volumzuwachs wurde nach jeder Dehnung bestimmt und betrug zum Beispiel bei Vorspannung auf die physiologische Länge im Durchschnitt 16 Prozent.

Die Auswertung der Originalkurven wurde nach dem folgenden, von *Bader* angegebenen Schema vorgenommen (1): Die Volumelastizität

$$1) \quad E' = \frac{dp}{dV} \cdot (\text{dyn/cm}^5)$$

wurde in der Art erhalten, daß auf die Originalkurve eine Glasplatte mit Millimeternetz aufgelegt wurde und alle 10 mm Hg möglichst genau die Tangente an die Kurve angelegt wurde. Die Steigung dieser Tangente läßt sich leicht in das tatsächliche  $E'$  umrechnen:

$$2) \quad E' = \frac{\text{tg } \alpha \cdot kV \cdot 13350}{kp}$$

(Hier bedeutet:  $\alpha$  = der Winkel, der durch die an die Kurve angelegte Tangente und die Abszisse gebildet wird;  $kV$  = die aus der Volumeichung errechnete Strecke auf der Abszisse pro  $\text{cm}^3$  in mm;  $kp$  = die aus der Druckeichung errechnete Strecke auf der Ordinate pro 10 mm Hg in mm; 13350 ist der 10 mm Hg entsprechende Wert in  $\text{dyn/cm}^2$ .) Wird vom Schnittpunkt der Tangente mit der Abszisse die Strecke, welche  $10 \text{ cm}^3$  Volumverschiebung entspricht, nach rechts abgetragen und in diesem Punkt der Ordinatenwert der Tangente (=  $a$ ) abgelesen, dann nimmt Gleichung 2) die Form:

$$3) \quad E' = \frac{a \cdot 13350}{kp}$$

an. Diese Methode vereinfacht die Ablesung an den Originalkurven und die Berechnung von  $E'$ .

Der *Frank'sche* Volumelastizitätsmodul  $\kappa$  wurde erhalten, indem  $E'$  mit dem im Moment in der Aorta vorhandenen Volumen multipliziert wurde:

$$4) \quad \kappa = \frac{dp}{dV} \cdot V = E' \cdot V \text{ (dyn/cm}^2\text{)}$$

### Ergebnisse

Die Originalkurven zeigen alle den typischen S-förmigen Verlauf, wie er auch bei Rinderaorten (7) und bei jungen menschlichen Aorten (1) zu beobachten ist. Ein Vergleich dieser Originalkurven von vorgespannten und nicht vorgespannten Aorten, in diesem Falle von Schweineaorten, läßt jedoch einige Unterschiede erkennen: der Anfangsteil der Kurven, der gegen die Abszisse konkav verläuft, flacht in dem Maße ab, in welchem die Vorspannung der Aorta vergrößert wird. Die Abflachung ist aber sehr gering und wird erst dann deutlich, wenn die Kurven aufeinander projiziert werden. Auch bei einer Vorspannung, deren Größe einem Druck von 200 mm Hg im Innern der Aorta entspricht, ist der Anfangsteil der Originalkurven noch deutlich konkav gegenüber der Abszisse.

Die Wendepunkte der Originalkurven werden bei den verschiedenen Vorspannungen bei annähernd gleichem Volumen erreicht. Dabei ist zu beachten, daß der Kurvenanfang um den Betrag auf der Abszisse nach rechts gerückt wird, um den das Volumen der freien Aorta durch die Vorspannung zugenommen hat. Auf die Ordinate projiziert sind dann die Wendepunkte mit zunehmender Vorspannung abszissenwärts, also in niedrigere Druckbereiche verschoben.

Abbildung 1 zeigt zwei Druck-Volum-Diagramme einer Schweineaorta in freier Lage (a) und bei einer Vorspannung, die einem Innendruck von 200 mm Hg entspricht (b). Die Kurven, die bei Vorspannung auf die physiologische Länge und bei den Vorspannungen, welche einem Aorteninnendruck von 50, 100 und 150 mm Hg entsprechen, erhalten wurden, liegen im Anfangsteil zwischen den in Abbildung 1 dargestellten Originalkurven. Sie wurden in der Zeichnung der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

Die steilen Endstücke der Originalkurven einer verschieden stark vorgespannten Aorta laufen untereinander parallel und liegen sehr dicht beisammen.

Die in situ gemessene, als physiologische Länge bezeichnete Ausdehnung der Aorten liegt zwischen den Längen, die bei einem Innendruck von 100 und 150 mm Hg ermittelt wurden. Das heißt, daß die physiologische Länge einer Ausdehnung der Aorta entspricht, welche diese in freier Lage bei einem Innendruck zwischen 100 und 150 mm Hg erreicht.

Auch die  $\kappa$ -Kurven, die dadurch erhalten werden, daß man die aus den Originalkurven ermittelten  $\kappa$ -Werte abhängig vom Druck in ein Koordinatensystem einordnet, zeigen wie die Originalkurven bei den freien und vorgespannten Aorten einige Unterschiede. (Die  $\kappa$ -Werte werden auf der Ordinate, der Druck auf der Abszisse eingetragen.)

In ihrem Verlauf weisen die  $\kappa$ -Kurven als gemeinsames Kennzeichen einen horizontalen Anfangsteil und einen daran anschließenden, steil aufwärts ziehenden Endabschnitt auf.

Der Anfangsteil der  $\kappa$ -Kurven läuft bei nicht vorgespannten Aorten vom Beginn der Dehnung an mit negativer Steigung bogenförmig zur Abszisse hin. Bei den vorgespannten Aorten rückt der Beginn der  $\kappa$ -Kurven auf der Ordinate immer mehr nach niedrigeren  $\kappa$ -Werten zu. Außerdem verringert sich die negative Steigung und die Kurve wird nahezu eine horizontale Gerade, unabhängig davon, wie stark vorgespannt war. Die Anfangsteile der  $\kappa$ -Kurven vorgespannter Aorten laufen demnach zueinander parallel und sind wie ihr Beginn auf der Ordinate mit wachsender Vorspannung nach niedrigeren  $\kappa$ -Werten hin verlagert.

Diese Tatsache bringt es mit sich, daß die  $\kappa$ -Kurven einer verschieden stark vorgespannten Aorta mit der  $\kappa$ -Kurve kreuzen, die sich aus der Originalkurve einer freien Dehnung herleitet. Die Kreuzung erfolgt um so später, je höher der Grad der Vorspannung war. Umgekehrt beginnt der Übergang in den steilen Endabschnitt der  $\kappa$ -Kurven bei erhöhter Vorspannung früher. Die steilen Abschnitte der  $\kappa$ -Kurven von freien und vorgespannten Aorten laufen zueinander parallel und sind dem früher einsetzenden Beginn des steilen Endstückes entsprechend um so weiter auf der Abszisse ordinatenwärts verschoben, je höher die Vorspannung gewählt war.

Abbildung 2 zeigt den *Frank'schen* Volumelastizitätsmodul  $\kappa$ , dargestellt als Funktion des Druckes. Es sind wiederum nur zwei Kurven gezeichnet: die eine ist von einer freien Dehnung abgeleitet, die andere wurde bei einer Vorspannung erhalten, die einem Aorteninnendruck von 200 mm Hg entspricht. Die übrigen  $\kappa$ -Kurven liegen im horizontalen Anfangsteil zwischen Abszisse und der  $\kappa$ -Kurve der vorgespannten Aorta, im steilen Endstück zwischen den  $\kappa$ -Kurven der freien und der vorgespannten Aorta.

## Besprechung der Ergebnisse

Vor einer Besprechung der Ergebnisse der Aortendehnungen muß noch auf eine Arbeit von *Bader* und *Kapal* eingegangen werden (3), in welcher über die Dehnungsversuche mit Gummischläuchen bei unterschiedlichen Vorspannungen berichtet wird. Es wurden dabei jeweils vier Dehnungen eines Gummischlauches vorgenommen: eine freie Dehnung und drei Dehnungen bei einer Vorspannung um 10, 50 und 100 Prozent der ursprünglichen Länge. Bei jeder Dehnung wurden die Gummischläuche bis zum Eintritt der Blähung aufgepumpt.

Es zeigte sich dabei in den Originalkurven, daß die Blähung eines Schlauches jedesmal ungefähr bei gleichem Volumen erfolgte, daß aber der Blähungsdruck um so niedriger war, je größer die Vorspannung gewählt wurde. Ebenso verhielt sich der Druckabfall nach der Blähung, der mit steigender Vorspannung immer flacher wurde.

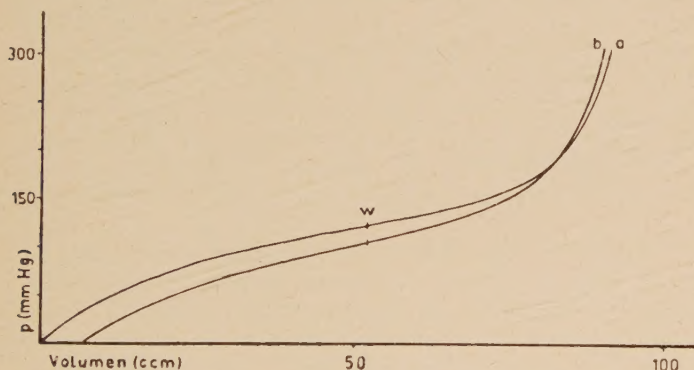


Abb. 1: Original-Druck-Volumendiagramme einer Schweineaorta: a) in freier Lage; b) vorgespannt auf eine Länge, die einem Innendruck von 200 mm Hg entspricht. W = Wendepunkt.

Die Vergrößerung des Ausgangsvolumens, welche durch die Streckung bei den Gummischläuchen ebenso auftrat wie bei den Aorten, beruht nach *Bader* und *Kapal* auf der Tatsache, daß durch den Verschluß des Schlauches mittels zweier Gummistöpsel (bei den Aorten wurden Glasglocken verwendet) der Radius an beiden Enden des Gummischlauches konstant blieb, wogegen der Radius des übrigen Schlauches abnahm. Es ergab sich somit

am Schlauch eine Zone, die durch den Übergang vom Radius des Stöpsels auf den Radius des gedehnten Schlauches charakterisiert war. Durch diesen Übergang aber wurde das theoretisch zu erwartende Volumen vergrößert, welches gleich dem Volumen des freien Schlauches bleiben müßte, wenn dafür gesorgt wäre, daß der Radius des gestreckten Schlauches in sich auf der ganzen Schlauchlänge konstant bleibt. Die Volumvergrößerung, die bei den Aortenversuchen durch die Vorspannung zustande kam, ist also wahrscheinlich ebenso ein Kunstprodukt, das durch die Methodik bedingt ist.

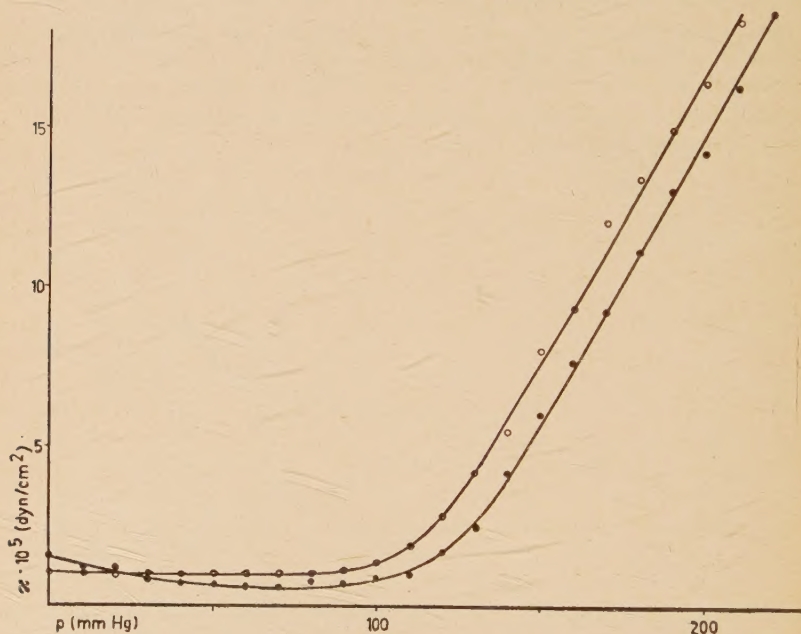


Abb. 2: Der Frank'sche Volumelastizitätsmodul  $\kappa$  einer Schweineaorta, dargestellt als Funktion des Druckes. ●—●  $\kappa$  — Werte der Aorta in freier Lage. ○—○  $\kappa$  — Werte der Aorta, vorgespannt auf die Länge, die einem Innendruck von 200 mm Hg entspricht.

Die  $\kappa$  -Kurven eines vorgespannten Gummischlauches sind in ihren horizontalen Anfangsstücken nach niedrigeren Druckwerten hin verschoben und zwar um so mehr, je stärker der Gummischlauch vorgespannt war. Die

horizontalen Abschnitte der  $\kappa$ -Kurven von vorgespannten Schläuchen laufen außerdem annähernd parallel zueinander und weisen eine geringere negative Steigung auf als die  $\kappa$ -Kurven der frei gedehnten Gummischläuche.

Die steilen Endabschnitte der  $\kappa$ -Kurven, wie sie bei den Aortendehnungen zu beobachten sind, fehlen bei den  $\kappa$ -Kurven der Gummischläuche infolge der auftretenden Blähung des Materials.

Wie aus dem bisher Gesagten zu entnehmen ist, zeigen die Ergebnisse der Aortendehnungen gewisse Übereinstimmungen mit den Ergebnissen, welche die Dehnungen der Gummischläuche ergaben. Dabei handelt es sich um das gleichartige Verhalten der Originalkurven in deren Anfangsteilen, also bei den Aorten um das Stück bis zum Wendepunkt und bei den Originalkurven der Gummischläuche um das Stück bis zum Eintritt der Blähung. Die Originalkurven entsprechen sich also insofern, als trotz Vergrößerung der Vorspannung bei den Aorten der Wendepunkt und bei den Gummischläuchen die Blähung bei gleichem Volumen auftritt. Dabei rücken diese beiden Punkte gemäß der Vorspannung abszissenwärts, also in niedrigere Druckbereiche.

Vom Wendepunkt, bzw. vom Blähungspunkt der Originalkurven ab verhalten sich die Aorten und die Gummischläuche gänzlich verschiedenartig. Bei den Aorten bewirkt eine weitere Vergrößerung des Volumens einen steilen Anstieg des Innendruckes, sowohl in freier Lage als bei Dehnung in vorgespanntem Ausgangszustand. Bei den Gummischläuchen dagegen erfolgt durch die Blähung des Materials in jedem Falle sofort ein Druckabfall.

Die Aorten und die Gummischläuche zeigen analog zu demselben Verhalten der Originalkurven in ihren  $\kappa$ -Kurven den gleichen Verlauf im horizontalen Anfangsteil. Die negative Steigung des Horizontalteiles der freien Aorten- $\kappa$ -Kurven wird durch die Vorspannung flacher und geht in einen ziemlich geradlinigen, abszissenparallelen Verlauf über. Die  $\kappa$ -Kurven der Aorten weisen damit das gleiche Verhalten auf wie die  $\kappa$ -Kurven der Gummischläuche, bei welchen die negative Steigung durch die Vorspannung ebenfalls flacher wird.

Bei den Aorten und den Gummischläuchen bleibt also im ersten Abschnitt der Dehnung, wie aus dem geradlinigen und horizontalen Verlauf der  $\kappa$ -Kurven zu entnehmen ist, der *Frank'sche* Volumelastizitätsmodul  $\kappa$  konstant. Er ändert sich in dem Punkt, da der steile Endteil der Aorten- $\kappa$ -Kurven beginnt. Dieser Punkt, der bei den vorgespannten Aorten früher erreicht wird als bei den frei gedehnten Aorten, liegt bei einem Druck, dessen Wert sich zwischen 100 und 150 mm Hg befindet. Im Gegensatz zu den

Gummischläuchen zeigten die Aorten keinerlei Blähungserscheinungen, jedenfalls nicht unterhalb eines Innendruckes von 300 mm Hg, welcher der bei den Aortendehnungen erreichte Maximaldruck war.

Die Wendepunkte der Aortenoriginalkurven werden, wie schon ausgeführt, trotz Veränderung der Vorspannung bei gleichem Volumen erreicht. Sie kommen jedoch bei Vergrößerung der Vorspannung in niedrigere Druckbereiche zu liegen. Dieses Verhalten der Wendepunkte in den Originalkurven hat bei den  $\alpha$ -Kurven die Verschiebung der steilen Endabschnitte in niedrigere Druckbereiche zur Folge. Die steilen Endstücke wandern also auf der Abszisse in Richtung Ordinate. An ihrer Steigung ändert sich dabei nichts, im Gegensatz zum flachen Anfangsteil der Aorten- $\alpha$ -Kurven.

*Wagner und Kapal* (7), *Bader und Kapal* (2) konnten zeigen, daß der gegen die Abszisse konkave Anfangsteil der Druck-Volum-Diagramme und der daraus erhaltene Horizontalteil der  $\alpha$ -Kurven durch die elastischen Fasern der Aortenwand bedingt ist. Sie konnten ferner zeigen, daß der Abschnitt der Druck-Volum-Diagramme nach dem Wendepunkt, der gegen die Abszisse konvex verläuft und der davon abgeleitete steile Endteil der  $\alpha$ -Kurven durch die kollagenen Fasern verursacht wird, welche in das elastische Fasernetz eingelagert sind (4).

Zusammen mit diesen Ausführungen lassen die Ergebnisse der Druck-Volum-Diagramme von den in freiem Zustand und bei verschiedenen Vorspannungen gedehnten Schweineaorten folgenden Schluß zu:

Durch die Vergrößerung der Vorspannung wandert, wie bereits ausgeführt, der Wendepunkt in den Originalkurven niedrigeren Druckwerten zu. Als Folge davon rückt der steile Endteil der Aorten- $\alpha$ -Kurven immer weiter nach links, also ordinatenwärts, während seine Steigung durch den Grad der Vorspannung nicht verändert wird. Das bedeutet, daß die kollagenen Fasern der Aortenwand in die Vorspannung nicht miteinbezogen und damit bei einer Dehnung der Aorta in Längsrichtung nicht beansprucht werden. Das Kollagen wird vielmehr erst bei einer Belastung der Aortenwand in transversaler Richtung wirksam, wodurch die Elastizität der Aorta erhöht wird.

## *Zusammenfassung*

Mit der von *Wagner* und *Kapal* angegebenen Methode wurde das elastische Verhalten von Schweineaorten in freiem und vorgespanntem Ausgangszustand untersucht. Es zeigte sich dabei, daß der Wendepunkt der Druck-Volum-Diagramme einer vorgespannten Aorta bei annähernd gleichem Volumen, aber bei niedrigerem Druck eintritt. Das hat zur Folge, daß die steilen Teile der  $\alpha$ -Kurven mit steigender Vorspannung ordinatenwärts wandern. Sie laufen jedoch zueinander parallel, was zu dem Schlusse führt, daß die kollagenen Fasern im Gegensatz zu den elastischen Fasern nicht in die Vorspannung miteinbezogen werden, sondern nur in transversaler Richtung wirksam sind.

## *Schrifttum*

- 1) Bader, H., Inaug. Diss. München 1956, Z. Biol. 108 (1956): 321—329—
- 2) Bader, H. u. E. Kapal, Z. Biol. 109 (1957): 325—331 — 3) dies., unveröffentlichte Untersuchungen — 4) Benninghoff, A., Handbuch der mikroskop. Anatomie VI, 1 (1930): 85 — 5) Fuchs, R. F., Z. für allg. Physiologie 2 (1903): 15 — 6) Thoma, R. u. E. Kaefer, Virchows Arch. 116 (1889): 1 —
- 7) Wagner, R. u. E. Kapal, Z. Biol. 104 (1951): 169 — 8) dies., Z. Biol. 105 (1952): 163

### *Lebenslauf*

Am 21. September 1932 wurde ich, *Hans Sigl*, in Straubing (Niederbayern) geboren und besuchte dort von 1939 bis 1943 die Volksschule. 1943 wurde ich in die damalige Oberschule für Jungen in Straubing aufgenommen. Nach 1945 trat ich in das Humanistische Gymnasium in Straubing ein, wechselte aber 1949 in die Oberrealschule in Straubing über, an der ich 1952 die Reifeprüfung ablegte. Seit 1952 studierte ich an der Universität zu München Medizin. Die ärztliche Vorprüfung bestand ich im Sommersemester 1955, das ärztliche Staatsexamen im Herbst 1958.